

# Plasmonen, Spinspiralen und Graphen

Highlights aus dem Programm der Sektion Kondensierte Materie (SKM)

Rainer Scharf

Die Sektion Kondensierte Materie (SKM), der frühere Arbeitskreis Festkörperphysik, hatte zu ihrer diesjährigen Frühjahrstagung nach Dresden eingeladen. Rund 5000 Physikerinnen und Physiker nahmen an der Tagung teil und boten mit über 2700 Vorträgen und 1600 Postern eine große Themenvielfalt.

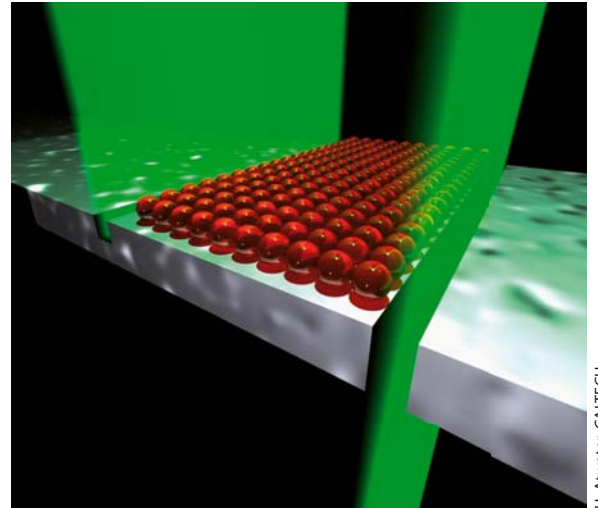
## Vielversprechende Plasmonik

In der Grenzfläche zwischen einem Metall und einem Dielektrikum kann Licht elektronische Dichtewellen anregen. Welche ungewöhnlichen Eigenschaften diese Oberflächenplasmonen haben und wie sie sich nutzen lassen, beschrieb Harry Atwater vom Caltech. Die Plasmonen haben zwar die gleiche Frequenz wie das anregende sichtbare oder infrarote Licht, aber eine wesentlich kürzere Wellenlänge, die kleiner als 100 nm sein kann. Damit wird es möglich, die in der Elektronik erreichte Miniaturisierung auch für die Photonik nutzbar zu machen. Während sich mit Licht viel mehr Information als auf elektronischem Wege übertragen lässt, schränkt die Beugungsgrenze die Miniaturisierung der optischen Bauelemente stark ein. Nach Umwandlung von optischen in plasmonische Signale könnten diese in Nanostrukturen eingespeist und verarbeitet werden.

In solch kleinen Strukturen erleiden die Plasmonen zwar Verluste, die ihre Ausbreitung einschränken. Mit Schlitzwellenleitern, in denen ein dielektrischer Kern von einer Metallschicht umgeben ist, konnten Atwater und seine Kollegen die Verluste reduzieren und die Plasmonen immerhin über einige zehn  $\mu\text{m}$  übertragen. Zudem ließ sich die Wel-

lenlänge der Plasmonen dadurch reduzieren, dass der Durchmesser des Wellenleiterkerns verringert wurde. In den Schlitzwellenleitern treten plasmonische Moden mit stark negativem Brechungsindex (bis zu  $-5$ ) auf, die sich ausbreiten können. Eine dreidimensionale Struktur aus diesen Wellenleitern könnte ein Meta-material mit negativem Brechungsindex ergeben, welches das Licht in die falsche Richtung bricht.

Wie gut eine submikroskopisch kleine Öffnung in einer Metallschicht das Licht durchlässt, hängt von den Oberflächenplasmonen in der Schicht ab. Das haben Atwater und seine Kollegen für einen plasmonischen Lichtmodulator ausgenutzt, der aus einer dünnen Silberschicht bestand, die einen lichtdurchlässigen Spalt und parallel dazu eine Kerbe enthielt (Abb. 1). Zwischen Spalt und Kerbe befand sich ein Plasmonenresonator aus vielen CdSe-Quantenpunkten. Ein Signal erzeugte an der Kerbe Plasmonen, die zum Spalt liefen und dort mit dem direkt auftreffenden Licht interferierten. Je nach Interferenz ließ der Spalt das Licht mehr oder weniger gut durch. Mit einem Kontrollstrahl anderer Frequenz, der ebenfalls Plasmonen erzeugte, konnte die Ausbreitung der Signalplasmonen im Resonator beeinflusst werden, sodass sich die Interferenz änderte und mit ihr die Intensität des durch den Spalt gehenden Signals. Kürzlich haben die Forscher einen plasmonischen Feldeffektmodulator gebaut, einen „PlasMOSTor“, das optische Analogon eines Transistors. Dazu steuert eine Gatespannung, die von einer Photodiode geliefert werden kann, ein Signal im nahen IR, das in einem Schlitzwellenleiter plasmonisch zwischen Source und Drain transportiert wird. Auf diese Weise



H. Atwater, CALTECH

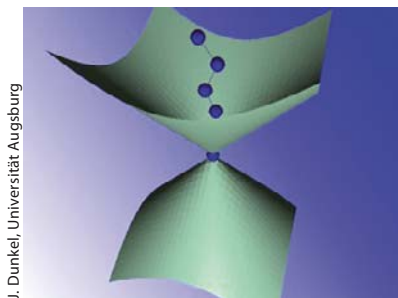
Abb. 1 In einem plasmonischen Lichtmodulator kann ein Signalstrahl durch den Spalt (rechts) gehen oder in einer Kerbe (links) Oberflächenplasmonen anregen, die einen Bereich mit Quantenpunkten durchlaufen und anschließend mit dem durchgehenden Strahl interferieren.

ließ sich ein extrem schneller, rein optischer Transistor realisieren.

## Nützliche Brownsche Bewegung

Die Brownsche Bewegung hat für die Entwicklung der Thermodynamik und der Statistischen Physik eine zentrale Rolle gespielt. Als Brownsches Rauschen findet sie auch außerhalb der Physik Anwendung, z. B. in der Biologie oder der Finanzphysik. Einige neuere Ergebnisse und Anwendungen beschrieb Peter Hänggi von der Universität Augsburg.

Gängige Modelle für die Brownsche Bewegung eines Teilchens erlauben unendlich große Teilchengeschwindigkeiten – im Widerspruch zur Relativitätstheorie. Um Abhilfe zu schaffen, müssen die Molekülgeschwindigkeiten des Wärmebads, in dem sich das Teilchen bewegt, einer relativistischen Verallgemeinerung der Maxwell'schen Geschwindigkeitsverteilung folgen. Solch eine Verteilung war 1911 von Ferencz Jüttner hergeleitet worden, deren



J. Dunkel, Universität Augsburg

**Abb. 2** Die Trajektorie eines relativistischen Brownschen Teilchens im Vorwärtslichtkegel: Die Teilchengeschwindigkeit ist stets kleiner als die Lichtgeschwindigkeit.

Gültigkeit Hänggi und seine Kollegen mit molekuldynamischen Simulationen bestätigen konnten. Demnach lässt sich die Temperatur eines Gases Lorentz-invariant definieren. Sie ist unabhängig davon, wie schnell sich das Gas relativ zum Beobachter bewegt, also ein Lorentz-Skalar. Darauf aufbauend sind verschiedene Modelle für die relativistische Brownsche Bewegung entwickelt worden, bei denen die Teilchengeschwindigkeit stets kleiner als  $c$  ist (**Abb. 2**).

Das zumeist störende Brownsche Rauschen kann auch nützliche Folgen haben, wie Hänggi am Beispiel der stochastischen Resonanz (SR) erläuterte. Die Verstärkung eines schwachen Signals mithilfe eines nichtlinearen Systems lässt sich optimieren, wenn man dem Signal wohl dosiert Rauschen hinzufügt. Dadurch lässt sich z. B. die visuelle wie auch die taktile Wahrnehmung verbessern. Das nutzt die SR-Therapie aus, die mit abwechselnd periodisch und stochastisch vibrierenden Fußmatten das Koordinationsvermögen von Patienten verbessert. Auch Brownsche Motoren nutzen das Rauschen, indem sie es in gerichtete Bewegung umwandeln. Ein Beispiel dafür ist ein periodisch an- und abgeschaltetes „Ratschenpotential“, in dem sich Teilchen befinden. Die durch Brownsches Rauschen angetriebenen Teilchen laufen in diesem Potential überwiegend in eine Richtung. Brownsche Motoren spielen beim gerichteten Transport in der lebenden Zelle eine wichtige Rolle. Künstliche Brownsche Motoren können Ionen, Atome, magnetische Flussquanten, Spins oder Nanopartikel transportieren.

## Angeregte Kooperation

Ultrakurze Pulse lassen sich für einen großen Bereich des elektromagnetischen Spektrums herstellen, von der Terahertzstrahlung bis zur harten Röntgenstrahlung. Damit wird es möglich, sehr schnelle Vorgänge in Festkörpern z. B. mit Laserpulsen auszulösen und ihren weiteren Verlauf mit gepulster Laser- oder Röntgenstrahlung schnappschussartig zu verfolgen. Andrea Cavalleri und seine Mitarbeiter vom Center for Free Electron Laser Science (CFEL) der Universität Hamburg untersuchen auf diese Weise verschiedene photoinduzierte Phasenübergänge in komplexen Festkörpern, deren Elektronen stark korreliert sind. Mit einem fs-Laserpuls werden etwa  $10^{21}$  Elektron-Loch-Paare pro  $\text{cm}^3$  erzeugt, und es entsteht eine metastabile Phase. Durch Kooperation der Anregungen findet auf der Zeitskala der atomaren Schwingungen, also innerhalb von Femtosekunden, ein Phasenübergang statt. Je nachdem, ob es sich um einen elektronischen oder strukturellen Phasenübergang handelt, verfolgen ihn die Forscher mit ultrakurzen Laserpulsen oder gepulsten kohärenten Röntgenstrahlen, wie sie der Freie-Elektronen-Laser FLASH am DESY in Hamburg liefert.

So haben Cavalleri und seine Kollegen das photoinduzierte „Schmelzen“ eines Mott-Isolators untersucht, das nur einige Femtosekunden dauert. In einem Mott-Isolator ist die lokale, abstoßende Wechselwirkung zwischen den Elektronen größer als deren kinetische Energie. Da keine unbesetzten Gitterplätze vorhanden sind, können sich die Elektronen nicht im Kristall umher bewegen. Wenn jedoch durch Anregung des Isolators mit einem ultrakurzen Laserpuls plötzlich unbesetzte Gitterplätze entstehen, können die Elektronen in sie hinein tunneln und sich auf diese Weise fortbewegen. Dadurch wandelt sich der Mott-Isolator innerhalb der Tunnelzeit der Elektronen in einen elektrischen Leiter um. An dem eindimensionalen organischen

Mott-Isolator ET-F<sub>2</sub>TCNQ konnten die Forscher diesen Übergang verfolgen. Dazu haben sie mit einem zweiten ultrakurzen Laserpuls, der eine variable Zeitverzögerung hatte, die Änderung der Reflektivität des Materials mit hoher Zeitauflösung gemessen. Es zeigte sich, dass der Mott-Isolator innerhalb von 20 fs geschmolzen war.

Sehr komplexe Phasenübergänge treten in Übergangsmetalloxiden auf, wobei außer den Ladungen und Spins der Elektronen auch ihre Orbitale sowie die Gitterfreiheitsgrade beteiligt sind. So lassen sich in Manganiten Metall-Isolator-Übergänge sowohl durch Temperaturänderung als auch durch Magnetfelder, Druck oder Bestrahlung mit Licht auslösen. Besonders interessant ist das Perowskit-Manganit Pr<sub>1-x</sub>Ca<sub>x</sub>MnO<sub>3</sub> (PCMO), das für alle chemischen Zusammensetzungen  $x$  ein Isolator ist, doch für  $x = 0,3$  einen „versteckten“ metastabilen metallischen Zustand aufweist. Durch direkte Anregung einer bestimmten Phononmode mit fs-IR-Pulsen gelang es, den Übergang vom Isolator zum Metall innerhalb von 200 fs auszulösen. Durch die Mode wurde eine orthorhombische Verzerrung der Kristallstruktur aufgehoben, die zur Lokalisierung der Elektronen geführt hatte. Darüber hinaus fanden die Forscher Hinweise auf kollektive elektronische Anregungen oder „Orbitonen“, bei denen die d-Orbitale der Manganatome eine kohärente Welle bilden. Mit ultrakurzen Röntgenpulsen wollen die Forscher diese orbitale Ordnung zeitaufgelöst beobachten und der angeregten Kooperation der verschiedenen Freiheitsgrade auf den Grund gehen.

## Multiferroische Spinspiralen

Multiferroika sind Materialien, die gleichzeitig elektrische und magnetische Ordnung zeigen. Dabei können sich ihre elektrischen und magnetischen Eigenschaften gegenseitig beeinflussen. Das macht Multiferroika auch in praktischer Hinsicht interessant, da sich aus ihnen möglicherweise magnetische

Speichermedien herstellen lassen, die sehr schnell elektrisch beschrieben und gelesen werden könnten, ohne dass dazu verlustreiche elektrische Ströme fließen müssten. Unter diesen ungewöhnlichen Materialien sind die „spinspiralen“ Multiferroika wie  $\text{TbMnO}_3$  und  $\text{MnWO}_4$  besonders bemerkenswert. In ihnen induziert die spontane antiferromagnetische Ordnung, die eine zyklische oder spiralförmige Komponente hat, eine elektrische Polarisation. Diese Polarisation ist zwar wesentlich kleiner als die elektrische Polarisation herkömmlicher Ferroelektrika, doch sie ist viel stärker mit der Magnetisierung gekoppelt als jene. Trotz intensiver Erforschung geben die spinspiralen Ferroelektrika viele Rätsel auf. So hatte man in ihnen bisher weder magnetische noch ferroelektrische Domänen erkennen können. Doch wie Thomas Lottermoser von der Universität Bonn berichtete, ist ihm und seinen Kollegen kürzlich der Nachweis gelungen, dass  $\text{MnWO}_4$  mindestens acht verschiedene Typen von Spinspiraldomänen hat, die mit zwei ferroelektrischen Domänentypen gekoppelt sind.

Damit die magnetische Ordnung in einem Material eine elektrische Polarisation hervorrufen kann, muss sie die Inversionssymmetrie brechen. Das kann z. B. dadurch geschehen, dass sich die magnetischen Momente zyklisch oder spiral ausrichten. Schreitet man längs einer Kristallachse von einem Spin zum nächsten voran, so sind die starren Ausrichtungen benachbarter Spins um einen konstanten Winkel gegeneinander gedreht. Diese Drehung findet in einer Ebene statt, die von der Kristallachse und der induzierten elektrischen Polarisation aufgespannt wird. Dabei kann die Polarisation je nach Drehsinn in zwei entgegengesetzte Richtungen zeigen. Im  $\text{MnWO}_4$  sind die magnetischen Momente der  $\text{Mn}^{2+}$ -Ionen bei sehr tiefen Temperaturen antiferromagnetisch geordnet. Zwischen 7,6 K und 12,7 K zeigt diese Ordnung eine zyklische Komponente, durch die das Material elektrisch polarisiert wird. Aufgrund der Symme-

trieerniedrigung durch die Ausbildung der Spinspiralen erwartet man bei  $\text{MnWO}_4$  je nach Drehsinn der Spiralen jeweils eine Vervielfachung der Anzahl möglicher Spinspiraldomänen, die sich durch Translationen entlang der Spirale ineinander überführen lassen. Insgesamt sollten somit mindestens acht Typen von Spinspiraldomänen auftreten zusammen mit zwei ferroelektrischen Domänen.

Diese Domänenvielfalt haben die Bonner Forscher mithilfe der nichtlinearen optischen Eigenschaften des Multiferroikums untersucht. Dabei nutzten sie die räumlich aufgelöste Erzeugung der zweiten Harmonischen: Von intensivem, gepulstem Laserlicht bestrahlt, gab das kristalline Material frequenzverdoppeltes Licht ab, dessen Amplitude und Phase von der lokalen ferroelektrischen und magnetischen Ordnung im Kristall abhingen. Auf diese Weise ließen sich die vorhergesagten magnetischen und elektrischen Domänentypen sichtbar machen und identifizieren. In elektrischen und magnetischen Feldern verhalten sich die Domänen überraschend. So kann ein elektrisches Feld die antiferromagnetische Ordnung von  $\text{MnWO}_4$  zwischen zwei Zuständen schalten, wobei Hysterese auftritt. Ein starkes Magnetfeld richtet die Spins aus und lässt die elektrische Polarisation verschwinden. Doch die antiferromagnetische Ordnung bleibt dabei versteckt erhalten. Entfernt man das Magnetfeld, so tauchen die ferroelektrischen Domänen mit ihrer ursprünglichen Polarisation wieder auf.

### Filigranes aus Graphen

Die ungewöhnlichen Eigenschaften des Graphens, der zweidimensionalen Form des Kohlenstoffs, faszinieren Experimentatoren und Theoretiker. Da sich die beweglichen Ladungsträger des Graphens wie masselose Dirac-Teilchen verhalten, lassen sich an ihnen relativistische Effekte untersuchen. Wie schon an Galliumarsenid-Heterostrukturen kann man auch an Graphen Phäno-

me der mesoskopischen Physik studieren wie den Quanten-Hall-Effekt, die Ladungsquantisierung, den Aharonov-Bohm-Effekt oder die Coulomb-Blockade, erklärte Thomas Ihn von der ETH Zürich. Das Ziel seiner Untersuchungen ist es, die Bewegungen der Ladungsträger in Graphen in vorgegebene Bahnen zu lenken, mit elektrischen Feldern zu steuern und neuartige elektronische Schaltkreise herzustellen.

So haben Ihn und seine Kollegen Engstellen aus Graphen gefertigt, die Breiten von 30 nm bis 100 nm hatten. Dazu wurden einlagige Graphenflocken auf ein mit Siliziumdioxid überzogenes Back-Gate aus dotiertem Silizium gebracht, durch Ätzen zurechtgeschnitten und kontaktiert. Für kleine oder verschwindende Back-Gate-Spannung wurde die Leitfähigkeit des Graphens in der Engstelle stark unterdrückt. Dieser intensiv untersuchte „Transport-Gap“ gibt noch immer Rätsel auf. Er ist keine normale Bandlücke im Energiespektrum des Graphenengpasses, da er zahlreiche Resonanzen enthält, an denen die Leitfähigkeit relativ groß ist. Man vermutet vielmehr, dass Unordnung an den Rändern der Engstelle zu lokalisierten Zuständen führt und dadurch den Transport behindert. Messungen an Engstellen un-

### SKF-DISSERTATIONSPREIS

Malte C. Gather (links) erhielt für seine an der Universität Köln angefertigte Dissertation über „OLEDs Setting Out in New Directions – From Displays to Sensors“ den diesjährigen Dissertationspreis der Sektion Kondensierte Materie (SKM) aus den Händen des SKM-Sprechers Rolf Haug.



K. Juszcak

terschiedlicher Breite zeigten einen merklichen Transport-Gap erst für Breiten unterhalb von 50 nm. Je schmaler und länger der Engpass ist, umso weniger perkolierende Zustände gibt es, die den Ladungstransport sicherstellen können.

Auch Quantenpunkte lassen sich aus Graphen fertigen. Dazu haben Ihn und seine Kollegen eine Graphenflocke auf ein Back-Gate gelegt und so zurechtgeschnitten, dass eine 180 nm breite Insel in zwei 50 nm schmale Streifen auslief, die mit dem Source- bzw. Drain-Kontakt verbunden wurden. Mit drei Elektroden, die ebenfalls aus Graphen bestanden, ließen sich das elektrische Potential in der Insel sowie die Engstellen elektrostatisch regeln. Wurde eine Source-Drain-Spannung an den Quantenpunkt angelegt, so floss ein elektrischer Strom, der aber für bestimmte Werte des Potentials der Insel zum Erliegen kam. Es trat eine Coulomb-Blockade auf: Die einzelnen Ladungen konnten nicht auf den Quantenpunkt gelangen, um ihn zu passieren, da die zu seiner Aufladung nötige elektrostatische Energie zu groß war. Auf diese Weise konnten die Forscher einen Einzelelektronentransistor herstellen.

## Selbstheilendes Gummi

Gummis sind ungewöhnliche elastische Materialien. Unter Zugbelastung dehnen sich Gummibänder um ein Vielfaches ihrer Länge, doch wenn die Belastung aufhört, nehmen sie wieder ihre ursprüngliche Form an. Die Gummielastizität ist eine Eigenschaft von Materialien aus vernetzten Makromolekülen, die kovalent miteinander verbunden sind. Zerreißen diese Bindungen oder die Moleküle bei zu hoher Beanspruchung, so kann man sie unter normalen Temperatur- und Druckbedingungen nicht wieder „flicken“. Doch auch aus kleinen Molekülen lassen sich gummielastische Materialien herstellen, wie Ludwik Leibler von der Ecole Supérieure de Physique et Chimie Industrielle berichtete. Hier binden Wasserstoffbrücken die Moleküle locker zu Ketten zusammen und vernetzen diese miteinander (Abb. 3). Das Molekülgeflecht besteht also weiterhin aus vielen Einzelmolekülen, es ist „supramolekular“. Aufgrund des modularen Aufbaus und der Wasserstoffbrücken haben diese Materialien selbstheilende Eigenschaften.

Die Forscher stellten den selbstheilenden Gummi aus Pflanzenöl und Harnstoff her und gaben Dodekan als Weichmacher hinzu. Das entstehende supramolekulare Geflecht enthielt zwei Arten von Bausteinen: stäbchenförmige kettenbildende Moleküle mit zwei Wasserstoffbrücken an ihren Enden und sternförmige Moleküle mit drei Brücken, die für die Vernetzung der Ketten sorgten. Das nicht klebrige Material hatte gummielastische Eigenschaften. So ließ sich das supramolekulare Gummi auf die dreifache Länge dehnen, wobei es seine Elastizität behielt. Wurde das Gummi auf mehr als fünffache Länge gedehnt, zerriss es. Teilstücke von zerrissenen oder zerschnittenen Gummis, deren Trennflächen bei Zimmertemperatur und ohne Druck 15 Minuten aneinander gehalten wurden, verbanden sich wieder miteinander. Das geheilte Gummi konnte dann auf die doppelte Länge gedehnt werden, bevor es er-

neut riss. Da die Selbstheilungskräfte nicht ermüdeten, ließ sich diese Prozedur beliebig oft wiederholen.

Kamen die zerbrochenen Wasserstoffbrücken in den aufeinander liegenden Trennflächen einander nahe genug, so konnten sie sich von selbst wieder schließen und eine Verbindung herstellen. Man durfte jedoch nicht zu lange nach dem Zertrennen des Gummis damit warten, die Trennflächen in Kontakt zu bringen, da sich sonst Wasserstoffbrücken zwischen Molekülen derselben Trennfläche bildeten und dadurch verloren gingen. Je höher die Temperatur war, umso agiler waren die gebrochenen Wasserstoffbrücken und umso schneller mussten die Trennflächen in Kontakt gebracht werden, damit eine belastbare Verbindung zustande kommen konnte. Die selbstheilenden Fähigkeiten des Gummis könnte man z. B. für Implantate wie künstliche Knochen oder Knorpel nutzen. Außerdem sollten sich die Materialeigenschaften durch Zugabe von Substanzen, die auf die Wasserstoffbrücken einwirken, auf vielfältige Weise ändern lassen.

## Spins für die Quanteninformation

Der Weg zu einem leistungsfähigen Quantencomputer ist noch weit, doch es gibt erfolgversprechende Ansätze, Quanteninformationen zu speichern und zu verarbeiten. Deren Einheit ist das Qubit, das sich als Quantenzustand eines Zwei-Niveau-Systems realisieren lässt. Das kann z. B. ein Ion mit zwei Hyperfeinzuständen sein, ein Quantenpunkt mit zwei Ladungszuständen oder einfach ein Elektron mit seinen beiden Spineinstellungen. Wie gut sich Elektronenspins dafür eignen, Qubits zu speichern und zu verarbeiten, haben Arzhang Ardavan von der University of Oxford und seine Kollegen experimentell an verschiedenen Systemen untersucht. Dazu gehörten Stickstoffatome in  $C_{60}$ -Käfigen als „molekulare Qubits“ und einzelne Phosphoratome in Siliziumkristallen als „Festkörperqubits“.

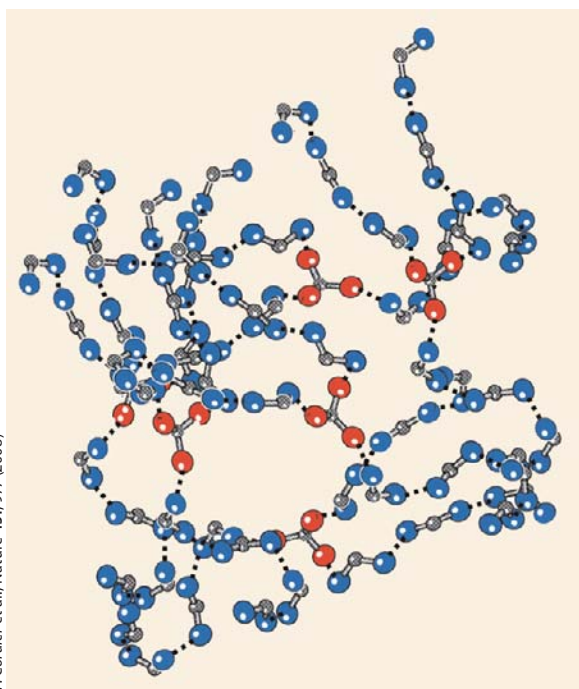


Abb. 3 Ein supramolekulares Netz aus ditopischen (blau) und tritopischen (rot) Molekülen, die zwei bzw. drei Wasserstoffbrückenbindungen eingehen können.

Mit Elektronenspinresonanz lässt sich gezielt auf Elektronenspins einzuwirken, um auf diese Weise Einzel-Qubit-Gatter zu realisieren. Die durch ein Magnetfeld energetisch aufgespaltenen beiden Spin-zustände wurden durch eine Folge von Mikrowellenpulsen bestimmter Dauer und Stärke in die gewünschte kohärente Überlagerung gebracht. Dabei traten verschiedene Probleme auf. Jeder Puls drehte den Spin mit einem bestimmten Drehwinkel um eine gewünschte Achse, doch Winkel und Achsenrichtung waren normalerweise fehlerbehaftet. Da zur Verarbeitung von Qubits viele solche Operationen notwendig sind, würden selbst kleine Fehler in ihrer Summe das Resultat völlig verfälschen. Durch geeignete Pulssequenzen gelang es den Forschern, diese Fehler so stark zu reduzieren, dass Verfahren zur Quantenfehlerkorrektur eingesetzt werden könnten.

Auch die Kopplung der Elektronenspins an ihre Umgebung, z. B. an benachbarte Kernspins, führte zu Fehlern. So zeigten die in den  $C_{60}$ -Molekülkäfigen gut abgeschirmten Elektronenspins der  $^{14}N$ -Atome abklingende Rabi-Oszillationen, allerdings mit sehr langen Kohärenzzeiten von 240  $\mu s$ . Dafür war die Kopplung zwischen dem Elektronen- und dem Kernspin des Stickstoffatoms verantwortlich. Wurde der Elektronenspin einer sehr schnellen Folge von Mikrowellenpulsen ausgesetzt, so störte dies seine Kopplung mit dem Kernspin, der sich daraufhin in einem beliebigen Zustand „einfrieren“ ließ. Mit diesem Verfahren könnte man Kernspin-Qubits stabilisieren. Hingegen ließ sich die Kopplung der Elektronen- und Kernspins von isolierten  $^{31}P$ -Atomen in isopuren  $^{28}Si$ -Kristallen nutzbar machen. Während sich die elektronischen Qubits leicht verarbeiten ließen, waren die nuklearen Qubits sehr lange haltbar. Das zeigte sich, als ein Qubit mit Radiofrequenzpulsen vom Elektronenspin auf den Kernspin übertragen wurde. Nach etwa einer Sekunde (!) wurde das Qubit auf den Elektronenspin zurückgebracht und analysiert: Es

hatte die Speicherdauer ohne große Verluste überstanden. So könnte man einen Quantenprozessor mit Elektronenspins realisieren, der auf einen Speicher mit Kernspins zurückgreift.

## Magnetismus auf atomarer Skala

Für bessere magnetische Datenspeicher wie auch für Spintronik und Quanteninformationsverarbeitung ist es nötig, das Verhalten magnetischer Nanostrukturen genauer zu verstehen und zu kontrollieren. Dazu gilt es, die Anordnung der Spins und ihrer Anregungen auf atomarer Skala zu bestimmen. Mit dem spinpolarisierten Rastertunnelmikroskop (SP-STM, spin-polarised scanning tunneling microscope) ist das möglich geworden, wie Roland Wiesendanger von der Universität Hamburg erklärte. Das SP-STM hat eine Spitze, die mit einer dünnen ferromagnetischen oder antiferromagnetischen Schicht überzogen ist. Der elektronische Tunnelstrom zwischen der Spitze und einer leitfähigen Probe wird nicht nur von der atomaren und elektronischen Struktur der Probenoberfläche beeinflusst, sondern er hängt auch davon ab, wie die Magnetisierungen der Oberfläche und der Spitze zueinander orientiert sind. Durch Messung des spinpolarisierten Stromflusses zwischen Probe und Spitze, in Abhängigkeit eines angelegten Magnetfeldes, lässt sich die Stärke und Richtung der Magnetisierung der Probe bestimmen.

Die Hamburger Forscher konnten z. B. die Magnetisierungskurve einzelner magnetischer Kobaltatome aufnehmen, die auf einer unmagnetischen Platin(111)-Oberfläche adsorbiert waren (Abb. 4). Um das magnetische Verhalten eines isolierten Kobaltatoms zu messen, wurde über ihm die Spitze des SP-STM positioniert. In einem äußeren Magnetfeld von variabler Stärke wurde dann gemessen, wie sich der magnetisierungsabhängige Tunnelstrom mit der elektrischen Spannung zwischen Spitze und Probe änderte. War das Kobaltatom weit entfernt von einem Kobalt-

streifen, so hatte es eine S-förmige Magnetisierungskurve. Befand es sich hingegen in der Nähe eines Streifens, so trat eine Hysterese auf. Daraus konnten die Forscher ermitteln, wie die bis zu 100  $\mu eV$  große Austauschenergie zwischen Kobaltatomen von deren Abstand zum Kobaltstreifen abhing. Der um null oszillierende Kurvenverlauf zeigte, dass die Wechselwirkung mehrfach zwischen ferro- und antiferromagnetisch wechselte, um schließlich für Entfernungen von weniger als 1 nm ferromagnetisch zu bleiben.

Mit dem SP-STM lässt sich die Magnetisierung von Nanostrukturen oder Einzelatomen auf unmagnetischen Oberflächen nicht nur messen, sondern durch Injektion von spinpolarisierten Strömen auch gezielt verändern. Das haben die Hamburger Forscher u. a. an etwa 4 nm großen Eiseninseln auf einem Wolfram(110)-Substrat gezeigt. Die Inseln, die eine Atomlage dick waren und ca. 100 Atome enthielten, bestanden jeweils aus einer einzigen

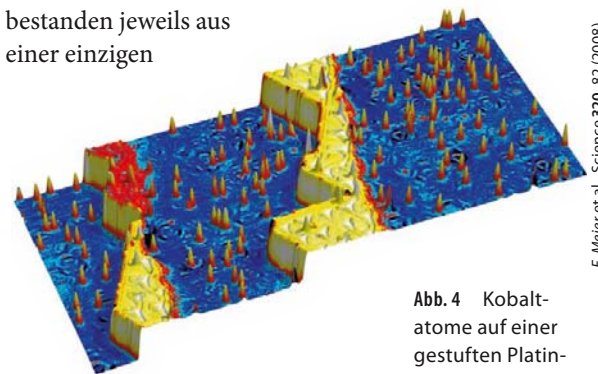


Abb. 4 Kobaltatome auf einer gestuften Platin-Oberfläche sitzen entweder vereinzelt auf den Plateaus oder sammeln sich an den Stufenkanten und bilden nanoskalige Streifen.

ferromagnetischen Domäne. Deren Magnetisierung lag parallel oder antiparallel zu einer bestimmten Richtung in der Oberfläche und konnte thermisch bedingt zwischen diesen beiden Ausrichtungen wechseln, wie die Untersuchung mit dem SP-STM für schwache Spinströme zeigte. Wurde die Stromstärke stetig erhöht, so trat eine Spinrichtung erst bevorzugt und dann ausschließlich auf. Auch für thermisch stabile Eiseninseln ließ sich die Magnetisierungsrichtung mittels SP-STM umschalten. Damit wird es möglich, magnetische Medien mit ultrahoher Speicherdichte zu beschreiben, ohne dass beim Adressieren eines Bits dessen Nachbarbits durch magnetische Streufelder verfälscht werden.